

Principes de modélisation pour la simulation acoustique

A. Dawans, J.-N. Demaret¹, S. Safin, D. Schmitz,
P. Leclercq

Lucid - Université de Liège - Belgique

¹ *Aspirant du F.R.S.-FNRS.*

RÉSUMÉ. L'article présente la démarche de développement d'une méthode logicielle de modélisation architecturale, développée à l'intention des acousticiens chargés de formuler les options technologiques nécessaires pour assurer les performances acoustiques d'un bâtiment (salle de concert, auditorium, théâtre, etc.). Basé sur une approche "centrée utilisateur", l'outil facilite grandement la description géométrique et technologique de l'espace intérieur en conception. Nous présentons d'abord l'analyse d'activité d'un acousticien qui nous a permis de poser les grandes options du modèleur. Nous décrivons ensuite les principes d'interaction qui sous-tendent l'application et nous illustrons ses atouts et particularités par rapport aux méthodes actuelles. Finalement, nous commentons une première évaluation et nous discutons de la pertinence du développement d'outils de modélisation spécialisés.

MOTS-CLÉS : Modélisation numérique, simulation acoustique, conception centrée utilisateurs.

1. Introduction

Les grands projets de salles de spectacle font nécessairement intervenir les sciences de l'acoustique. Dès les phases amont de conception, les défauts acoustiques potentiels doivent pouvoir être identifiés afin d'éviter de coûteuses corrections a posteriori. Parmi les méthodes informatiques disponibles pour l'évaluation acoustique, l'auralisation permet de simuler la sonorité de l'espace architectural créé avant même sa construction (Embrechts et al., 2005 ; Vörländer, 2007).

La simulation du rendu acoustique d'une salle de spectacle nécessite de disposer d'un modèle 3D numérique de celle-ci qui sera utilisé dans un logiciel de tir de rayons. Ce modèle diffère à bien des égards d'un modèle

architectural classique (comme expliqué ci-après, les contraintes concernent le nombre de faces, la complexité, les méthodes de modélisation, etc.). Ces différences nous amènent à nous interroger sur les modalités d'interaction les plus pertinentes à mettre en œuvre dans un logiciel de modélisation dédié à l'acoustique.

Nous adoptons, pour ce faire, une démarche centrée utilisateurs afin d'appuyer le développement d'un outil innovant. Alliant les compétences d'ergonomes, d'architectes et d'informaticiens, notre démarche a pour objectif de prendre en compte l'activité réelle des utilisateurs pour le développement de solutions informatiques utiles et utilisables.

Dans un premier temps, nous rendons compte de l'analyse de l'activité des acousticiens, afin de déterminer les options pertinentes pour le modéleur. Nous décrivons ensuite les principes d'interaction implémentés dans la première version de l'outil. Nous détaillons dans la section suivante les résultats de l'évaluation du logiciel pour conclure sur les perspectives d'évolution.

2. Caractéristiques de la modélisation acoustique

Un modèle acoustique diffère d'un modèle architectural sur trois aspects principaux :

- **L'exigence de « fermeture » du modèle.** Pour simuler la propagation des ondes sonores dans l'espace intérieur d'un volume bâti, les méthodes logicielles par « tir de rayons » lancent, de manière aléatoire un très grand nombre de rayons dans toutes les directions au sein du modèle. Si un rayon vient à sortir de ce volume, les valeurs calculées des performances sont alors totalement faussées. A contrario, un modèle architectural ne nécessite aucune exigence de fermeture ou de cohérence, et l'apparence reste, dans ce cas, la seule nécessité.
- **La complexité du modèle.** Le nombre et la taille des faces constituent des éléments essentiels de la modélisation acoustique. En effet, le temps de calcul nécessaire pour réaliser une simulation par tir de rayons est directement proportionnel au nombre de faces présentes dans le modèle. En ce qui concerne la taille des faces, les logiciels de tir de rayons basent leurs algorithmes de calcul sur une simplification de comportements physiques complexes. Pour rester valables, ces formules considèrent certaines hypothèses comme une taille des faces suffisamment grande.
- **L'utilisateur.** La modélisation acoustique de la salle est le fait de l'acousticien qui est en charge des calculs et des simulations, et non de

l'architecte. C'est l'acousticien qui a la responsabilité de la simplification pertinente et de la complétude du modèle. Or, les acousticiens, dans leur formation et leur pratique, ne sont généralement pas rompus à l'utilisation de modeleurs architecturaux.

Au vu de ces différences fondamentales, nous avons fait le choix de fournir une solution dédiée à la modélisation acoustique, plutôt que de concevoir des outils de simplification de modèles architecturaux préexistants qui sont souvent très complexes, parfois incomplets ou approximatifs (du point de vue acoustique) et qui, de surcroît, sont créés par l'architecte et non par l'acousticien.

De nombreux logiciels réalisent des simplifications automatiques de modèles architecturaux grâce à des algorithmes repérant les faces excédentaires. Par exemple, le logiciel Odeon (www.odeon.dk) permet de réduire le nombre de faces de pratiquement 80% dans certains cas. Cependant, cette réduction est réalisée uniquement sur base géométrique alors que l'expertise métier de l'acousticien prend toute son importance dans la simplification judicieuse à opérer sur le modèle architectural. Cette simplification n'est pas uniquement basée sur la géométrie mais dépend également des caractéristiques de la salle étudiée (matériaux, proportions, forme, utilisation future, ...), des comportements physiques acoustiques ainsi que de l'expérience de l'acousticien.

Les logiciels de simulation acoustique les plus répandus intègrent un outil de modélisation géométrique et un système d'assignation de matériaux. La modélisation géométrique consiste en une saisie en trois dimensions de la géométrie des faces constituant l'enveloppe intérieure de la salle. L'assignation des propriétés de matériaux aux faces du modèle géométrique est toujours réalisée a posteriori (Malet, 2005). L'outil de modélisation comprend en général une interface de saisie en mode texte, permettant la création et la modification des faces du modèle. En plus de ces mécanismes élémentaires, des macros permettent parfois d'alléger le travail de modélisation en offrant à l'utilisateur le moyen de créer des objets ou des salles paramétrés ou de générer des objets par extrusion.

3. L'activité de l'acousticien

La simulation acoustique est une activité relativement longue, comprenant plusieurs étapes qui vont de la réception des plans à la détermination des valeurs des paramètres acoustiques objectifs de la salle. Il nous importe, pour le développement de notre modeleur, d'en comprendre les

tenants et les aboutissants. Pour ce faire, nous avons effectué plusieurs entretiens de recherche et nous avons observé l'activité de modélisation d'une salle de spectacle par un acousticien utilisant les outils actuels mis à sa disposition. De cette analyse d'activité, nous avons pu mettre en exergue les constats suivants.

La démarche de modélisation se fait sur base de plans papier fournis par l'architecte et à l'aide d'outils de mesure (règle), d'annotation (crayon) et d'un logiciel de calcul acoustique (SalRev, développé par nos partenaires acousticiens dans le projet, voir Embrechts & al., 1982 et 2005). L'activité peut être décrite en quatre grandes étapes :

- **Repérage et découpage des surfaces à modéliser** : l'acousticien simplifie les formes du plan (par exemple, une surface arrondie sera décomposée en un pentagone ou en plusieurs triangles), gère le nombre de faces et la taille de celles-ci. En effet, l'exécution du logiciel de simulation est plus efficace lorsqu'il s'agit de traiter un petit nombre de faces présentant une taille relativement grande.

- **Annotation du plan** : pour chacun des sommets des faces, l'acousticien calcule les coordonnées X, Y et Z afin de les encoder ultérieurement dans le logiciel de simulation. Ces informations sont nécessaires pour la détermination correcte de la position, de l'orientation et de la dimension de chacune des faces dont a besoin le logiciel de tir de rayons.

- **Identification des caractéristiques des parois** : grâce à son expertise, ainsi qu'aux informations fournies par l'architecte, l'acousticien identifie le type de matériaux pour chacune des surfaces et y associe, par bande d'octave, un coefficient d'absorption et un coefficient de diffusion.

- **Encodage des données dans un logiciel** : l'acousticien encode enfin les coordonnées dans le logiciel et associe, pour chaque surface, le type de matériau utilisé. Soulignons que ce travail est laborieux puisqu'il demande au professionnel d'entrer, une par une, les coordonnées des sommets des faces constituant la maquette 3D et augmente de manière dramatique le risque d'erreurs liées aux mesures et aux mémorisations. Cet encodage donnera finalement un fichier de données correspondant au modèle acoustique de la salle.

Le modèle acoustique obtenu au terme du processus de modélisation permettra de réaliser les calculs des paramètres objectifs par le logiciel de tirs de rayons. Ces étapes de modélisation sont néanmoins fortement consommatrices de temps au regard de l'ensemble du processus d'évaluation acoustique et permettent donc rarement à l'acousticien de tester plusieurs configurations.

À partir de cette analyse d'activité, nous avons pu identifier trois caractéristiques essentielles du travail de modélisation acoustique.

Premièrement, le travail se fait **sur base de plans et de coupes**. L'acousticien n'opère pas de découpage en faces dès le départ, mais sélectionne des **points pertinents** au coup par coup en fonction de la découverte plus fine des plans et des coupes. Le travail sur base de plans permet également à l'acousticien de « s'approprier » la salle et ses caractéristiques. Le modelleur doit donc permettre de travailler sur base de plans et de coupes de manière opportuniste, c'est-à-dire sans contraindre l'utilisateur à agir de façon déterminée. Ce travail en plan semble être un atout indéniable pour permettre une simplification efficace du modèle.

Deuxièmement, d'une manière générale, le relevé manuel des coordonnées des points est très fastidieux et peut mener à un grand nombre d'erreurs. Pour chacun des points, il est nécessaire à l'heure actuelle d'effectuer plusieurs opérations comportant des risques d'erreurs potentiels. Il faut donc **permettre un calcul automatisé des coordonnées X et Y des points sur base des plans**. Dans le même ordre d'idée, le modelleur doit disposer d'un moyen efficace de **détermination des coordonnées Z sur base des coupes**.

Troisièmement, le **lien fort existant entre la géométrisation et l'assignation des matériaux** dans le processus de modélisation ressort clairement de cette analyse. Le modelleur doit donc supporter une intégration importante de ces deux activités classiquement séparées dans les logiciels existants.

4. Options retenues pour le modelleur

Nous montrons dans cette section comment les principes identifiés lors de l'analyse d'activité ont été traduits en une méthode logicielle de modélisation sur base de plans et de coupes. Nous décrivons pour cela les principales fonctionnalités implémentées dans la version actuelle du modelleur (cf. Figure 1).

- Un premier module permet l'importation des plans et des coupes de l'espace intérieur à modéliser. Un outil « coupe » permet de positionner et de mettre à l'échelle automatiquement une ou plusieurs coupes par rapport à un plan dans l'espace de modélisation.
- Un outil « point » permet à l'acousticien de créer les points qu'il juge pertinents en les désignant sur le plan. Les coordonnées X et Y des points sont ainsi fixées. Un outil « déplacement vertical » permet ensuite de

fixer la coordonnée Z de ces points. Lors de ce déplacement, un trait de projection permet à l'utilisateur de se repérer sur la coupe. Ce processus permet d'automatiser entièrement l'encodage des coordonnées des points. Il évite ainsi à l'acousticien le long travail de mesure et de retranscription manuel, source de nombreuses erreurs. De plus, un système d'alignement automatique sur les trois axes (snapping) facilite le placement des points en permettant de les aligner précisément les uns par rapport aux autres sans devoir éditer leurs coordonnées.

- Un outil « face » permet ensuite de construire les faces du modèle acoustique. La création d'une face s'effectue par la sélection des trois ou quatre points qui la compose. La construction d'une face à quatre points peut conduire à la création d'une face gauche. Celles-ci sont automatiquement reconnues et affichées en surbrillance afin que l'utilisateur puisse facilement les identifier et les corriger.

- Enfin, un module d'assignation permet à l'utilisateur de déterminer les propriétés d'absorption et de diffusion des différentes surfaces en les sélectionnant et en leur attribuant les matériaux appropriés.

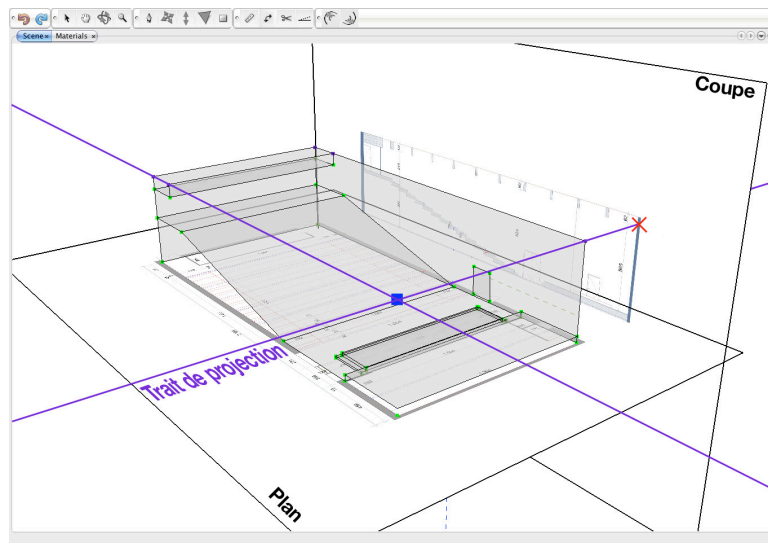


Figure 1. Capture d'écran du modèleur.

Trois différences importantes existent entre les outils classiques de modélisation acoustique et l'application spécifique proposée ici.

Premièrement, celle-ci permet l'insertion au sein du modèle de plans et de coupes de référence. Ceux-ci restent manipulables et garantissent à

l'utilisateur de disposer, au sein de l'espace de modélisation, de toutes les références utiles au positionnement des points dans le modèle 3D et le dispense ainsi du calcul manuel de coordonnées de points. Deuxièmement, la création des points dans l'espace 3D est réalisée en deux temps dans l'application proposée. Le pointage dans le plan horizontal définissant les coordonnées X et Y précède et facilite la définition a posteriori de la hauteur (coordonnée Z) du point. Cette méthode permet de faciliter la visualisation du modèle en cours de conception et de conserver au sein de l'univers 3D la hiérarchie existante entre les informations contenues en plan et celles contenues en coupe. Enfin, l'outil de modélisation face par face, avec accrochage sur les points préalablement définis, rend plus aisée la production de modèles acoustiques cohérents. En effet, ces opérations permettent une détection systématique de la création involontaire de surfaces gauches ou disjointes.

5. Évaluation du modèleur développé

Deux versions du modèleur ont été évaluées : une première avec sept étudiants ingénieur-architectes et une deuxième, intégrant déjà certaines corrections, avec un acousticien. Pour ces deux évaluations, il était demandé aux participants de modéliser une salle, suite à une courte formation à l'utilisation du logiciel. Les plans et coupes de la salle étaient fournis. Cinq étudiants ont été interrogés sur base d'un questionnaire distribué au terme de l'exercice. L'activité de modélisation des deux autres étudiants, ainsi que celle du professionnel, ont été observées directement par des ergonomes. Les participants étaient invités à verbaliser leurs pensées. Au terme de l'observation, un entretien était mené.

Les questionnaires et entretiens possédaient la même structure. Ils étaient basés sur les critères ergonomiques d'interfaces définis par Bastien et Scapin (Bastien & Scapin, 1993) et structurés en quatre axes : la pertinence des outils présents dans le modèleur (lisibilité – simplicité d'utilisation – apparence), la liberté dans les modalités de travail (modélisation – gestion des erreurs – informations fournies), la possibilité d'atteindre les objectifs liés à l'exercice (rapidité – précision), et l'identification des atouts et des faiblesses du modèleur.

Les testeurs de la première version du prototype (sept étudiants) déploraient surtout des problèmes de manipulations de la vue ainsi que l'absence d'une fonction d'annulation (undo), qui rend particulièrement fastidieuse la correction des erreurs de modélisation. Plus important, le

positionnement des points a été considéré comme difficile dans certains cas. En effet, le positionnement précis de sommets nécessite d'effectuer des zooms importants et répétés dans les plans et les coupes. Les participants ont ainsi jugé qu'une modélisation plus détaillée deviendrait trop fastidieuse à cause du nombre de points à positionner. A contrario, la construction des faces à partir de points a été perçue comme très aisée. Enfin, les atouts du modeleur qui nous ont été rapportés sont : sa simplicité d'utilisation, sa lisibilité et la possibilité de voir clairement l'évolution du travail effectué.

Ces évaluations ont permis de fournir un ensemble de recommandations pour la deuxième version du modeleur. Le testing de cette deuxième version a fourni les résultats suivants :

- Globalement, l'application permet de gagner un temps considérable en facilitant l'encodage des données, même si nous ne disposons pas encore de comparatif précisément chiffré. A titre indicatif, l'exercice de modélisation a duré une heure trente (prise en main du logiciel comprise) alors qu'il peut être estimé à environ six heures sur le logiciel actuellement utilisé par l'acousticien.
- Les fonctions de « snapping » sont jugées très utiles : elles permettent d'éviter un certain nombre d'erreurs (notamment liées aux faces gauches) et facilitent le repérage et le positionnement des points.
- L'utilisateur acousticien insiste, en outre, sur le fait que, malgré son manque d'expérience dans l'utilisation de vues 3D, il estime que la vue en plans et coupes est relativement aisée. La possibilité de visionner le plan et la coupe en même temps et à la même échelle est particulièrement appréciée. Le calcul automatique des coordonnées permet d'éviter un grand nombre d'erreurs.
- L'identification et la récupération des erreurs est rendue possible juste après leur occurrence. Dans les logiciels habituels c'est souvent à la fin du processus que les erreurs sont visibles.

Même si ces résultats doivent être interprétés avec une certaine prudence, compte tenu du biais lié au recours à des étudiants testeurs et du nombre réduit de professionnels, les conclusions que nous pouvons en tirer sont très instructives pour continuer le développement de l'outil dans une voie pertinente pour les utilisateurs.

6. Discussion et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté une démarche intégrée sous-

tendant le développement d'un modèleur à finalité acoustique. Cette démarche associant l'ergonomie cognitive, l'analyse d'activité et des allers-retours entre concepts et évaluations vise à développer un outil qui soit pertinent pour les utilisateurs dans leurs contextes d'action.

L'analyse d'activité nous a ainsi permis de mettre en évidence l'intérêt d'une approche en points et en faces sur base de plans et de coupes. Cette logique d'action, si elle s'écarte des modèleurs classiques en architecture, correspond bien aux usages des acousticiens, tout en répondant aux nécessités technologiques (complétude et simplicité du modèle) liées à la simulation acoustique.

Dans le cadre d'autres projets de recherche, nous sommes également confrontés à des problématiques d'élaboration de modèles architecturaux à des fins d'évaluation. Les principes de modélisation applicables aux différents domaines s'avèrent être totalement différents. En conception thermique, par exemple, la modélisation se fait principalement par composition de volumes cohérents entre eux (voir Juchmes et al., in press) alors qu'en acoustique, la modélisation se conduit essentiellement par la création de faces formant une enveloppe fermée. Ces caractéristiques particulières de modélisation sont directement issues des principes physiques régissant les comportements thermiques ou acoustiques des bâtiments modélisés, ainsi que de la façon dont ces principes sont intériorisés par les utilisateurs.

Nous voulons souligner ici l'intérêt d'un modèleur spécialisé et adapté au domaine d'évaluation. En effet, les besoins exprimés pour une tâche de modélisation particulière ne peuvent être rencontrés qu'au terme d'une analyse fine de cette activité, des comportements physiques qui sont à la base des évaluateurs que le modèle doit servir et par la mise en place de concepts tendant à répondre à toutes ces contingences. Par la comparaison avec d'autres modèleurs, nous avons ainsi mis en évidence l'incompatibilité de la réponse de ces logiciels généralistes, aux problèmes de modélisation rencontrés par les acousticiens.

L'intérêt de l'évaluation en cours de développement doit aussi être souligné. L'approche itérative et centrée sur les utilisateurs permet de valider les concepts implémentés, de tester l'utilisabilité du prototype et de fournir des recommandations pour un développement logiciel efficace. L'ensemble des recommandations fonctionnelles produites à la suite de l'évaluation avec le groupe d'étudiants nous ont ainsi permis de développer une seconde version du modèleur qui a pu elle-même être testée avec un professionnel de l'acoustique des salles. A son tour, celle-ci nous a permis d'identifier de nouveaux outils à intégrer aux principes de modéli-

sation actuels. Nous travaillons, par exemple, sur l'élaboration d'une nouvelle procédure de vérification automatique de la fermeture de l'espace modélisé.

7. Remerciements

Cette recherche est effectuée dans le cadre du projet Auralias (programme WIST 2 – Wallonie, Information, Société, Technologies – financé par la Région Wallonne de Belgique – Convention N° 616416) en collaboration avec les équipes INTELSIG (Université de Liège) et LISA (Université Libre de Bruxelles). Voir www.auralias.be.

8. Bibliographie

- Ahnert, W., Feistel, S., Schmitz, O., (2003). *Modern tools in acoustic design of concert halls and theatres-use and limitations of computer simulation and auralisation*. Moscou : XIII Session of the Russian Acoustical Society.
- Bastien, C. and Scapin, D. (1993). *Ergonomic Criteria for the Evaluation of Human-Computer Interfaces*. Rapport de l'INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.
- Embrechts, J.J. (1982). Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques. *Acustica*, 51(6), 288-295.
- Embrechts, J.J., Werner, N. and Lesoinne, S. (2005). Auralization in Room Acoustics using Directional Impulse Responses Computed by Sound Ray Techniques. *Proceedings of the 4th Forum Acusticum Congress*, Budapest, 2535-2538.
- Juchmes, R., Dawans, Ar., Delfosse, V., Dawans, Ad., Leclercq, P. (in press). Modélisation architecturale pour l'évaluation de la performance énergétique. *In press, Actes de Scan'09*, Nancy.
- Leon, J. C., (2006). *Modèle 3D et traitement acoustique, définition d'un outil d'aide à la conception acoustique des espaces architecturaux*. Mémoire de Master Design Global « Modélisation et simulation des Espaces Bâtis », Université Henri Poincaré, CRAI.
- Long, M. (2005). *Architectural Acoustics*. Academic Press.
- Malet, T., (2005). *Acoustique des salles : le guide de référence du praticien*. Paris : Publications Georges Ventillard.
- Nardi, B. (1996). *Context and Consciousness : Activity Theory and Human-Computer Interaction*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Norman, D.A. (1998). *The invisible computer*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Rabardel, P. (1995). *Les Hommes et les Technologies. Approche Cognitive des Instruments Contemporains*. Paris : Armand Colin.

- Savioja, L., (2000). *Modeling Techniques for Virtual Acoustics*. Thesis from Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki.
- Vorländer, M. (1997). *Auralization : Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin : Springer.